

초정밀 다이아몬드 터닝에 의한 무전해 니켈의 피삭성 연구

김우순*, 김동현#, 난바의치**

A Study on the Machinability of Electroless Nickel by the Ultra-Precision Diamond Turning

Woo Soon Kim*, Dong Hyun Kim# and Yoshiharu Namba**

ABSTRACT

The ultra-precision cutting is a key technique for the manufacture of optical components such as aluminium mirrors, electroless nickel mirror, plastic mirror in a variety of advanced science and technology applications. The paper presents experimental results of ultra-precision diamond turning of electroless nickel materials. In general, the cutting condition such as feed rate and depth of cut, have effect on the surface roughness in ultra-precision diamond turning. To obtain an optimal cutting condition, we studied the effect of the cutting speed, the tool length, the tool nose radius, the feed rate and depth of cut on the surface roughness. So, the relationship of the surface roughness and cutting condition has been clarified. From the experimental results, the machined surface roughnesses were obtained less than 1nm rms.

Key Words : Ultra-precision cutting(초정밀 절삭), Electroless nickel(무전해 니켈), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

현재 초정밀 광학렌즈가공이나 초정밀 방위산업 관련부품을 가공하는데 초정밀 다이아몬드 터닝 머신이 사용되고 있다. 초정밀 절삭 가공은 1962년 미국의 Union carbide사가 다이아몬드절삭 가공기술을 계획하고 프랑스의 Du pont사와 협동으로 고정도 기계를 개발한 것이 최초이다.¹ 1983년 Taniguchi²가 제창한 후 1987년 Mckeown³이 초정밀가공기계에 대한 의견을 발표하였다. 우리

나라는 1990년초부터 초정밀 절삭가공분야에 관심을 갖기 시작하였다.⁴

초정밀 절삭은 극히 높은 정밀도와 강성을 가진 공작기계, 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 피삭성이 좋은 공작물상에 진사하는 것이다. 초정밀 절삭은 공구 형상이 공작물에 그대로 진사되는 정도가 좋기 때문에 치수정도, 형상정도가 우수하다. 특히, 연질재료에 대해서는 고능률, 고정도로 가공면을 가공할 수 있는 잇점이 있다. 또한, 단결정 다이아몬드 공구가 갖는 대단히 예리하고 정확한 인

접수일: 2003년 11월 15일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

* 원광대학교 대학원 기계자동차공학부

교신저자 : 원광대학교 기계자동차공학부

E-mail knamba@wonkwang.ac.kr Tel. (063) 850-6689

** 일본 중부대학 기계공학과

선으로 가공하기 때문에 경면을 타 가공법에 비해 쉽게 얻을 수 있다.

그러나, 단결정 다이아몬드 공구의 재질 특성상 피삭재의 재질 선정에는 제약이 존재하는데 일반적으로 초정밀 절삭 가공을 하는 경우에는 비교적 피삭성이 좋고 다이아몬드와 친화력이 적은 알루미늄 합금이 주로 이용되고 있다. 초정밀 절삭가공 재료에는 알루미늄합금 이외에도 무산소동, 플라스틱등의 연질 재료등이 많이 이용되고 있으나, 이런 재료들은 서브 나노 오더의 정도의 절삭 표면을 얻기가 어렵다.

초정밀 절삭가공면의 표면거칠기는 주축 1회전 당의 이송에 크게 의존한다. 이송이 작은 미세 영역에서는 다결정체인 알루미늄합금 또는 무산소동은 입자내의 미끄럼변형에 의한 단차가 절삭면에 그대로 나타나게 되므로 서브나노 오더의 표면거칠기를 얻는 것은 대단히 어렵다.⁵ 이를 최소화하여 해결하기 위해서는 고정도, 고강성을 지닌 초정밀 가공기계와 내마멸성이 큰 다이아몬드 공구, 피삭재 및 최적의 절삭 조건을 찾아야만 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 광학부품용 재료로 이용되고 있으며 경질재료인 무전해 니켈을 초정밀 절삭가공 실험하였다. 입자내에서 미끄럼변형에 의한 단차의 발생이 없는 비정질 재료인 무전해 니켈을 피삭재로 하여 단결정 다이아몬드공구와 초정밀 가공기계를 이용하여 평면절삭을 행한 후, 각 절삭 조건에 따른 표면거칠기를 측정하여 무전해 니켈의 절삭특성을 파악하고 최적의 가공조건을 제안하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 초정밀 가공기^{6, 7}는 동시 3축 제어에 의해 초정밀 광학부품등의 경면을 가공할 수 있다. X축과 Z축은 베드위에 직교하도록 되어 있고, Z축 슬라이드 테이블에 공작물을 회전 구동시키는 주축이 설치되어 있다. B축 회전 테이블은 X축 테이블상에 설치되어 있고 B축 선회 중심상에 장착한 공구의 선단 각도를 제어할 수 있다. X축, Z축 슬라이드 테이블과 B축 회전테이블의 안내 베어링에는 유정압 베어링을 채용하였고, 주축에는 정압공기 베어링을 채용하였다.

사용된 초정밀 가공기의 위치 피이드백에는 레

이저 측정시스템을 이용하였다. 레이저 측정의 광축과 가공점을 일치시켜 아베오차를 저감하고, 레이저를 커버함으로써 주위의 온도변화를 받지 않도록 하였다. 초정밀 가공기는 최대가공직경 ϕ 140mm, 주축회전속도 30-2,000 rpm, X축, Z축 슬라이드 최소이동단위 0.36sec/pulse이며, 온도 $23\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 습도 40%이하, 공기청정도 클래스 100인 항온항습의 크린룸에서 설치되었다. Fig.1 은 본 연구에 사용된 초정밀 가공기를 나타낸다.



Fig. 1 Ultra-precision machine (AHN10, TOYOTA)

무전해 니켈(Electroless Nickel)은 니켈에 인을 함유시킨 것으로 경도가 Hv=550으로 대단히 경한 재료이지만, 단결정 다이아몬드공구를 이용하여 초정밀절삭이 가능함을 알았다. 무전해 니켈은 니켈에 포함된 인에 의해 그 성질이 변화하는데 Fig. 2에 니켈합금의 평형상태도를 나타내었다.⁸ 무전해 니켈은 저용점의 공정체가 니켈고용체와 Ni_3P 와의 2상 혼합물로서, 인 11%, 공정온도 880도 정도임을 알 수 있다. 인 10%까지의 영역은 니켈의 면심입방 구조에 인이 고용하고 있는 다결정상태이지만, 10%에 도달하면, 결정상태는 유지하지 않고 비정질 상태 또는 그것에 가까운 상태로 변화하게 된다. 여기에서, 인 함유량과 절삭특성을 검토한 보고서에 의하면 인 함유량이 12%를 넘고, 200°C 의 어닐링을 행한 것이 단결정 다이아몬드 절삭에 가장 적합한 것으로 보고되었다.

따라서, 본 연구에서는 ϕ 54 \times 12mm 두께의 알루미늄합금에 무전해 니켈을 120 μm 두께로 인 함유량을 10-13%로 도금한 것을 피삭재로 하여 초정밀 절삭 실험을 행하였다.

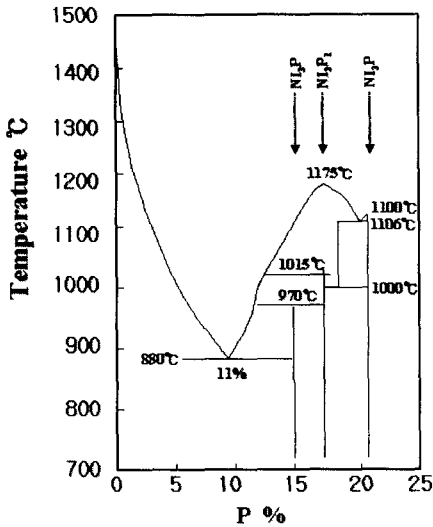


Fig. 2 Equilibrium diagram of Ni-P⁸

본 연구에 사용된 단결정 다이아몬드 공구는 (주)어라이드매터리얼제 절연의 선단반경이 1mm, 3mm, 5mm, 10mm인 것을 사용하였으며, Table 1과 Fig. 3은 단결정 다이아몬드 공구의 사양과 도면을 보여주고 있다.

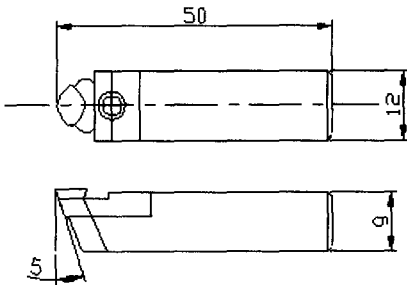


Fig. 3 Single Crystal Diamond Tool

Table 1 Specification of Single Crystal Diamond Tool

Nose Radius (mm)	Rake angle(°)	Relief angle(°)
1	0	5
3	0	5
5	0	5
10	0	5

공구의 상크부분은 절삭시의 저항에 의한 휨이나 진동을 방지하기 위하여 강성이 높은 초경합금을 사용하였다. 상크의 단면형상은 12mm×9mm의 각주이고, 다이아몬드 공구의 선단까지의 전체길이는 50mm이다.

2.1.1 실험방법

초정밀 가공기계를 이용하여 무전해니켈의 절삭 특성을 연구하기 위하여 정면 절삭을 행하였다. Fig. 4에서와 같이 진공척으로 구성된 주축에 무전해니켈을 고정하고, Z축 슬라이드 테이블 고정, X축 슬라이드 테이블 이동에 의해 정면 절삭을 행하였다.

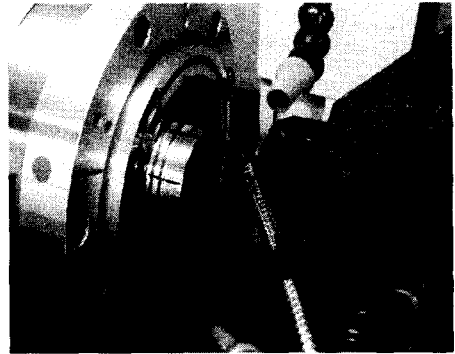


Fig. 4 Ultra-precision machining layout

공구대를 탑재한 X축 슬라이드 테이블에 이송을 주면서 실험하였고, 절삭유제는 비수용성 절삭유제 중에 점도가 낮은 등유를 이용하였으며, 미스트 노즐로 분무시켜 가면서 절삭 실험하였다.

Table 2 Specification of Three-Dimension Surface Analysis Microscope

Lens (NA)	×10
Interferenc type	MIRAU
Range profile (μm)	690×530
Sampling step (μm)	2.163
Vertical resolution (nm)	0.1
Horizontal resolution (nm)	1.18
Measurable maximum slope (dgr)	7.51
Focal distance (mm)	7.4

초정밀 절삭한 무전해 니켈의 가공면의 표면 거칠기 측정은 3차원표면구조해석현미경을 사용하였으며, Table 2은 3차원표면구조해석현미경의 사양이며, Fig. 5는 3차원표면구조해석현미경을 나타낸다.

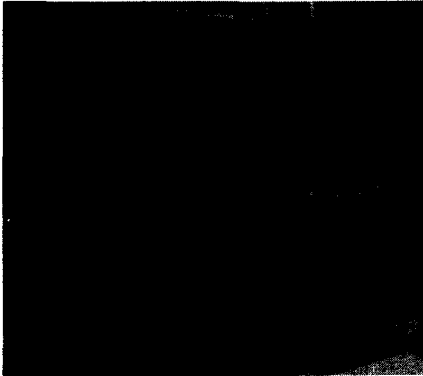


Fig. 5 Surface Measurement Apparatus (New view100, ZYGO)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이송 및 인선반경에 따른 표면 거칠기

인선형상이 원호형상인 단결정 다이아몬드 공구⁹를 이용하여 초정밀 절삭한 경우, 공구의 인선반경이 크면 클수록 표면거칠기가 작게 되고, 이송이 작을수록 표면거칠기가 작게 된다고 말할 수 있다. 따라서, 이송이 작은 영역에서는 표면거칠기가 이론적으로 작게 되기 때문에 공작물의 표면거칠기에 크게 영향을 미칠 것으로 예측된다.

그래서, 단결정 다이아몬드 공구는 등근형으로 인선 반경을 1mm, 3mm, 5mm, 10mm로 변화시켜 가면서 직경 54mm, 두께 12mm의 알루미늄합금에 무전해 니켈을 120 μ m 두께로 도금한 공작물을 초정밀 절삭하여 이송속도와 공구의 인선반경이 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하였다. 이때, 이송조건은 일반적인 초정밀절삭에서 경면을 얻기 위해 사용하는 조건으로 하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 무전해 니켈을 초정밀 절삭한 후, 표면거칠기(RMS)와 인선반경 및 이송속도와의 관계를 나타내었다.

초정밀 절삭한 무전해 니켈의 표면거칠기는 공구의 인선 반경에 의존하고, 인선 반경 10mm인 공구로 절삭할 때가 가장 좋은 표면거칠기 값을 보였다.

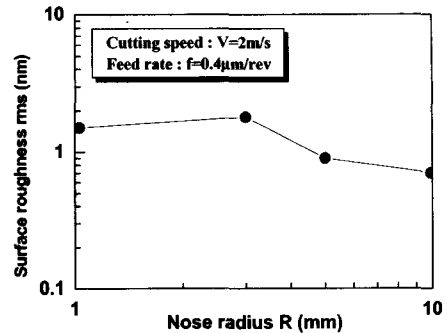


Fig. 6 Relationship between rms and Nose radius

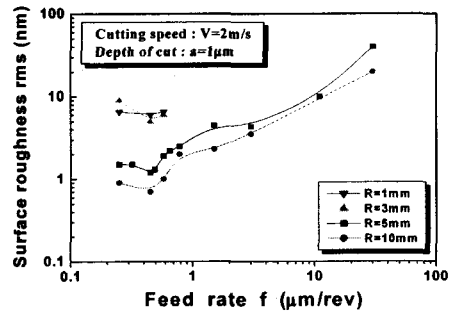


Fig. 7 Relationship between rms and Feed rate

일반적으로 이송이 작으면 더 매끄러운 표면 거칠기를 얻는 것으로 예측되나, 실험결과 0.4 μ m/rev 이하에서의 영역에서는 이러한 예측과도 일치하지 않았다. 이것은 진동과 같은 다른 외부요인이 더욱 크게 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선상의 표면을 형성시켜, 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송물만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어짐을 알았다.

3.2 공구의 고정길이에 따른 표면거칠기

초정밀 절삭은 공구대에 초정밀 다이아몬드 공구를 고정하여 가공하는데, 무전해 니켈은 경도가 높기 때문에 절삭 저항이 크고 공구와 공작물간의 상대진동이 발생하기 쉽다. 그 상대진동이 공구의 고정점으로부터 공작물과 접촉하는 공구선단까지의 거리가 변화함에 따라 가공표면에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

인선반경 10mm의 공구를 이용하여 절삭 속도 2m/s, 이송 0.4 μ m/rev 의 조건으로 공구의 고정점 위치로부터 절삭점까지의 거리(L)를 10mm에서 30mm로 변화시켜, 공구의 장착이 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰하였다.

Fig. 8은 고정점 위치로부터 절삭점까지의 거리를 정의하기 위하여 나타낸 것이고, Fig. 9는 초정밀 절삭한 무전해 니켈면의 표면거칠기와 거리(L)와 관계를 나타낸 것이다.

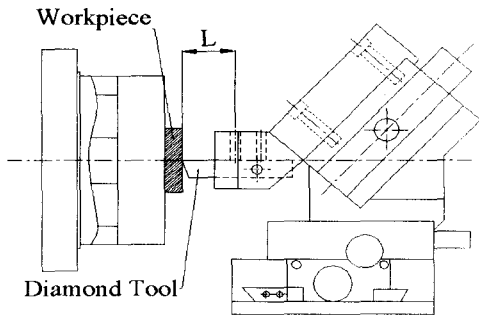


Fig. 8 Distance between the fulcrum and the cutting point

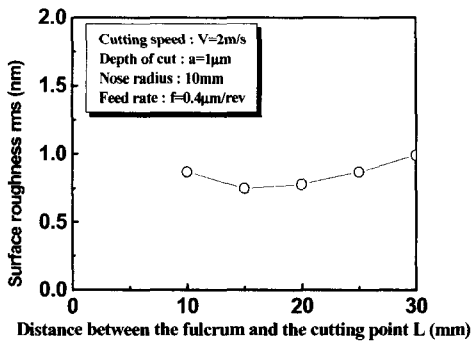


Fig. 9 Relationship between rms and L

공구의 고정 위치로부터 절삭점까지의 거리를 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm로 각각 변화시켜가면서 표면 거칠기를 조사한 결과, 공구의 고정 위치로부터 절삭점까지의 거리 15mm에서 20mm사이에서 표면거칠기가 가장 양호함을 알았다.

실제 절삭가공시 공구에 미치는 변형량을 해석하기 위하여 Pro-Engineer를 이용하여 3D 모델링한

후 해석틀인 Mechanica를 이용해서 Z축방향으로 1N의 힘을 주어 해석을 하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 정면 톨 홀더에 바이트의 고정점 L을 15mm로 하였을때 해석조건과 변형량을 해석한 결과이다

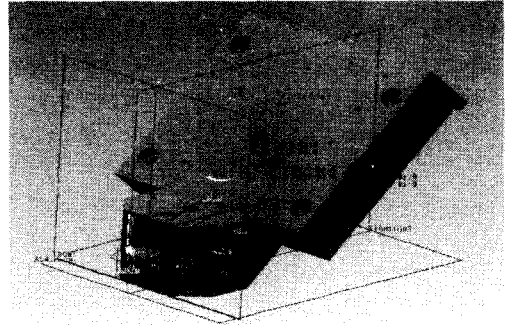


Fig. 10 Analysis condition (L=15mm)

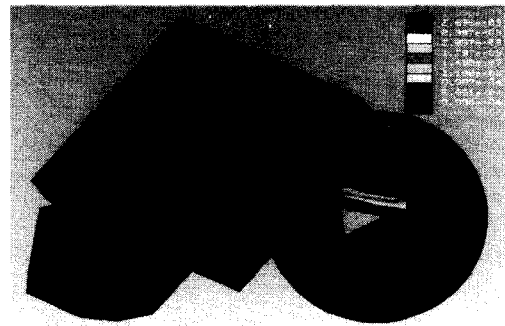


Fig. 11 Analysis result of tool holder (L=15mm)

양호한 표면거칠기를 보였던 공구의 고정 위치로부터 절삭점까지의 거리(L) 15mm~20mm범위에서 공구인선에 발생하는 변형을 해석한 결과, Z축방향으로의 1.5mm정도의 변형이 발생하였으며, 거리(L)가 표면거칠기에 영향을 줄 수 있는 인자임을 확인하였다

3.3 절삭깊이에 따른 표면거칠기

일반적으로 광학용 재료의 표면을 경면으로 가공하기 위하여 보통 천연 다이아몬드 공구를 사용하여 수 마이크로미터에서 수십 나노미터에 이르는 절삭깊이로 가공하고 있다.

절삭가공에 있어서 이론적 표면거칠기 값³은

절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 하지만, 실제 미소 절삭에서는 다른 견해가 있다. 원호날 형상의 공구에 의한 절삭은 인선의 형상이 그대로 공작물에 전사되고 공구 절삭깊이가 변화함에 따라 공구와 공작물의 접촉면적이 증가하고, 그것에 따라 절삭저항도 증가하여 무전해 니켈의 가공면의 표면거칠기가 변화할 것으로 예측된다.

표면거칠기에 영향을 미치는 절삭깊이의 영향을 실험적으로 검토하기 위하여 앞에서 얻은 실험 결과 데이터로부터 가장 이상적인 실험값을 보였던 인선반경 10mm의 공구를 이용하여, 절삭속도 2m/s, 이송 0.4 μ m/rev의 조건에서 절삭깊이를 0.1 μ m에서 10 μ m까지 변화시키면서 절삭 실험하였다.

Fig. 12는 무전해 니켈의 표면 거칠기에 미치는 절삭깊이의 영향을 나타내었다.

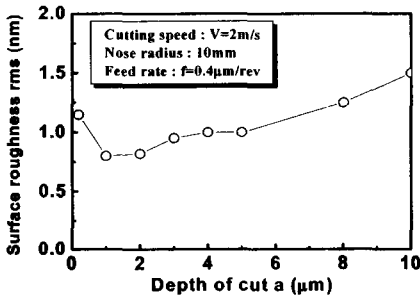


Fig. 12 Relationship between rms and depth of cut

표면 거칠기의 전체적인 양상은 절삭깊이가 감소함에 따라 작아지는 경향을 보이다가 절삭깊이 1~2 μ m에서부터 증가하는 양상을 보였다. 절삭깊이에 따라 표면 거칠기가 크게 되는 것은 절삭 깊이가 크게 되면 될수록 공구와 공작물의 접촉면적이 증가하고, 더불어 절삭 저항도 크게 되어 초정밀 다이아몬드 공구의 여유면에 공구마모가 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

절입 1~2 μ m이하에서는, 표면거칠기값이 증가하는데 이런 결과는 공작물과 공구간의 상대진동이 발생하고, 그 진동이 공작물에 채터링으로 전사됨에 따라 표면 거칠기가 증가한 것으로 사료된다. 또한, 연질인 알루미늄 합금은 미세 절삭시 공작물이 음의 공구상면경사각으로 절삭되는 형태가 되어 러빙이나 버니싱 같은 소성 변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 절삭속도에 따른 표면거칠기

Fig. 13은 무전해 니켈의 표면거칠기와 절삭속도의 관계를 나타낸다.

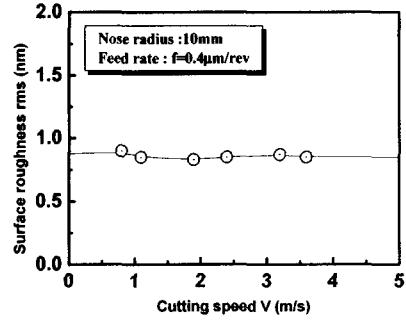


Fig. 13 Relationship between rms and cutting speed

엄격하게 통제되는 환경에서 가공이 이루어지는 상황에서도 절삭속도의 증가에 따라 절삭저항이 변화하여 가공 표면에 영향을 줄 것으로 예측된다. 하지만, 인선의 형상이 그대로 공작물에 전사된다고 할 때, 원호날 형상의 공구에 의한 절삭에 있어서는 절삭속도가 변화하더라도 가공물에 전사되는 형상은 변화하지 않을 것으로 보는 견해도 있다.

인선반경을 10mm의 공구를 이용하여 이송 0.4 μ m/rev, 절삭깊이 1 μ m의 조건에서 절삭속도 0.8m/s 3.6m/s까지 변화시켜 가면서 무전해 니켈을 절삭 실험하였다. 실험범위 내에서는 절삭속도가 빨라지더라도 표면거칠기 값은 큰 차이를 보이지 않았으며, 절삭속도에는 거의 영향을 받지 않음을 실험적으로 확인하였다.

Fig. 14은 3차원표면구조해석현미경으로 측정된 값을 나타낸다. 인선반경 10mm의 초정밀 다이아몬드공구와 이송 0.4 μ m/rev, 절삭깊이 2 μ m로 초정밀 절삭하여 표면거칠기 0.325nm rms값을 얻었다.

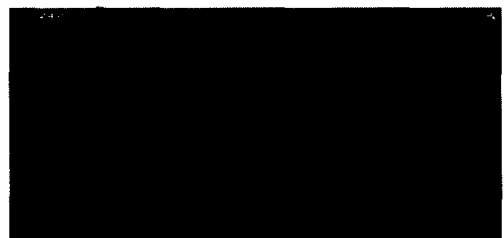


Fig. 14 A surface profile of machined surface

Fig. 15는 무전해 니켈을 정면절삭을 행한 후 얻은 경면을 나타낸 것이다.

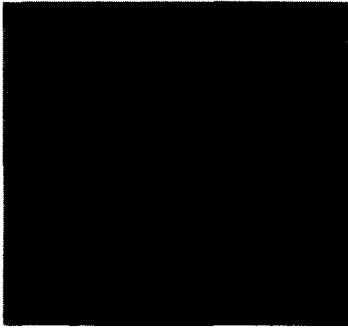


Fig. 15 Photograph of mached surface

4. 결론

직경 54mm, 두께 12mm의 알루미늄합금에 무전해니켈을 두께 120 μ m로 도금한 시료를 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 초정밀 절삭할 때, 인선반경, 공구의 고정길이, 절삭깊이, 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기에 대한 고찰한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 초정밀 절삭면의 표면거칠기는 실험한 범위내의 절삭속도에서 거의 변화를 보이지 않았고, 공구의 인선반경, 이송, 절삭깊이에 의존하며 실험에 의한 최적절삭조건은 인선반경 10mm, 절삭깊이 1~2 μ m이었다.
- (2) 이송이 1 μ m/rev 이하에서는 대체적으로 1~10 nm 정도의 표면거칠기 값을 보였으며 이송이 0.4 μ m/rev에서 가장 양호한 표면거칠기를 얻었다.
- (3) 공구의 고정길이(L)는 절삭점에 너무 가깝거나 멀어질수록 표면거칠기가 나빠지는 경향을 보였으며, 적정 고정길이(L)는 15mm와 20mm사이이다.
- (4) 인선 반경이 10mm인 단결정 다이아몬드공구와 이송 0.4 μ m/rev, 절삭깊이 2 μ m로 초정밀 절삭한 결과 표면거칠기 0.323nm rms를 얻었다.

후 기

이 논문은 2003년도 원광대학교 교비 지원에 의해서 수행됨.

참고문헌

1. Whitten, L.G., Lewis, T.G., "Machining and Measurement to Submicron Tolerance," Proc. M.T.D.R., Programon Press. pp.491, 1966.
2. Taniguchi, N., "Current Status in. and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing," Annals of the CIRP. Vol.32, No.2, pp. 573-582, 1983.
3. Mckeown, P.A., "The role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future," Annals of the CIRP. Vol.36, No.2, pp.495-501, 1987.
4. Kim, J.D., "Study on Mirror-Like Surface Machining of Al Alloy with Edge Form of Single Crystal Diamond Tools," Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.14, No.6, pp.1515-1522, 1990.
5. JSME, "Ultra-precision machining technology," pp. 48-50, 2000.
6. Kim, W.S., Chae, W.S., Kim, D.H. and Namba, Y., "A Study on the ultra precision Turning of Al-alloy," Proceedings of the KSMTE spring conference, pp.416-421, 2003.
7. Kim, W.S., Kim, D.H., Namba, Y., "A Study on the Surface Roughness in ultra precision Cutting of Electroless Nickel," Proceedings of the KSPE spring conference, pp.538-541, 2003.
8. Nippon Kanizen co., "Electroless Nicked Cooled Kanizen method," pp.48-50, 2000.
9. Brinksmeier, E., Riemer, O., "Tools and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning," proc. of Int. Precision Engineering, pp.125-133, 1993.